

ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ КОМПЕНСАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ПОРОГОВЫХ ДАТЧИКОВ РАЗНОСТИ ДАВЛЕНИЙ С МЕМБРАННЫМ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

В. Н. Китаев¹, Д. И. Сафонов², А. Е. Кирюнин³, Е. К. Хованова⁴

^{1, 2, 3, 4} Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина, Снежинск, Россия
¹ kb2@vniitf.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Пороговые датчики разности давлений с мембранным чувствительным элементом ввиду их надежности находят широкое применение в технологическом оборудовании и технических системах для обеспечения требуемого избытка давления воздуха по сравнению с внешним атмосферным давлением в помещениях для спортивных мероприятий (быстро возводимых физкультурно-оздоровительных комплексах с надувным перекрытием), в чистых технологических помещениях с нормируемым содержанием в воздухе пыли, микроорганизмов, аэрозольных частиц и химических паров. Датчики подобного типа для обеспечения необходимых технических характеристик требуют: высокой герметичности сварных соединений элементов конструкции; применения высокогерметичных металлостеклянных спаев; применения гофрированных мембран из материалов, обеспечивающих высокую чувствительность и высокую электропроводность. *Материалы и методы.* Для выполнения перечисленных требований на основании имеющегося научно-технического задела корпусные детали пороговых датчиков давления, температурные изменения размеров которых вызывают перемещения центров мембран, целесообразно выполнять из ковара 29НК-ВИ ГОСТ 10994-74, обеспечивающего хорошую свариваемость приборными видами сварок и герметичность спаев со стеклом С48-2 ОСТ 11 027.010-75, из-за согласованности по коэффициенту линейного теплового расширения (КЛТР). Мембраны выполняются из холоднокатаных лент из бериллиевых бронз БрБНТ 1-9, БрБ2 по ГОСТ 1789-2013, обеспечивающих высокую чувствительность и хорошую свариваемость с корпусными деталями из ковара, а также высокую электропроводность, так как электрическая цепь организовывается через мембраны. Контакты, закрепляемые в центрах мембран, также выполняются из бериллиевых бронз. Одинаковый материал мембран и контактов обеспечивает надежное закрепление контактов, например, точечной лазерной сваркой. *Результаты и выводы.* Из-за значительного различия коэффициента линейного теплового расширения ковара и бериллиевой бронзы в требуемом диапазоне температур технические решения пороговых датчиков давления подобного типа требуют конструкторских мер, обеспечивающих компенсацию неизбежной в этом случае температурной погрешности, особенно если датчики эксплуатируются в широком диапазоне температур внешней среды. Температурная погрешность обычно значительно превышает погрешности от других физических факторов (вибрации, линейного ускорения).

Ключевые слова: пороговый датчик разности давлений, мембранный чувствительный элемент, контактная система, температурная погрешность, компенсация температурной погрешности

Для цитирования: Китаев В. Н., Сафонов Д. И., Кирюнин А. Е., Хованова Е. К. Технические решения компенсации температурной погрешности пороговых датчиков разности давлений с мембранным чувствительным элементом // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 2. С. 72–79. doi: 10.21685/2307-4205-2024-2-8

ENGINEERING SOLUTION ON COMPENSATION OF THE COMPLEMENTARY TEMPERATURE ERRORS IN THRESHOLD PRESSURE DIFFERENCE DIAPHRAGM SENSORS

V.N. Kitaev¹, D.I. Safonov², A.E. Kiryunin³, E.K. Khovanova⁴

^{1, 2, 3, 4} Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia
¹ kb2@vniitf.ru

Abstract. *Background.* The threshold pressure difference diaphragm sensors are widely applied in the engineering systems because of their reliability. To ensure necessary features such sensors have to possess: high tightness of

welded joints of a design; glass-to-metal seals; presence of bellows made of both fast response and high conductivity materials. *Materials and methods.* To meet the above requirements the body parts of the threshold pressure sensors, which size variations cause shifting of diaphragms center, are expediently to be made of kovar 29NK-VI GOST 10994-74 guaranteeing high weldability and impermeability of soldered joints with glass S48-2 OST 11 027.010-75 due to consistency in linear thermal extension coefficient (LTEC). Diaphragms are made of cold-rolled beryllium bronze bands BrBNT 1-9, BrB2, GOST 1789-2013, providing fast response and good weldability with kovar-made body parts and also high conductivity because the electric circuit is designed passing through the diaphragms. Pins in the center of the diaphragms have also to be made of beryllium bronze. Identical materials for both diaphragms and pins guarantee contacts reliability for example by spot laser weld. *Results and conclusions.* Notable difference in the LTEC of kovar and beryllium bronze within specified temperature range entails design response for the threshold pressure sensors to compensate inevitable temperature error, especially in operation under wide thermal load of the environment. The temperature is the most significant of physical factors (vibration, linear acceleration) from the error standpoint.

Keywords: threshold pressure difference sensor, diaphragm sensor, contact system, temperature error, temperature error compensation

For citation: Kitaev V.N., Safonov D.I., Kiryunin A.E., Khovanova E.K. Engineering solution on compensation of the complementary temperature errors in threshold pressure difference diaphragm sensors. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2024;(2):72–79. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-2-8

Актуальность

Пороговые датчики разности давлений с мембранным чувствительным элементом ввиду их надежности находят широкое применение в технологическом оборудовании и технических системах [1] для обеспечения требуемого избытка давления по сравнению с внешним атмосферным давлением в помещениях для спортивных мероприятий (быстро возводимых физкультурно-оздоровительных комплексах с надувным перекрытием), в чистых технологических помещениях с нормируемым содержанием в воздухе пыли, микроорганизмов, аэрозольных частиц и химических паров. Датчики подобного типа для обеспечения необходимых технических характеристик требуют:

- высокой герметичности сварных соединений элементов конструкции;
- применения высоко герметичных металлоглазанных спаев;
- применения гофрированных мембран из материалов, обеспечивающих высокую чувствительность и высокую электропроводность.

Для выполнения перечисленных требований на основании имеющегося научно-технического задела [2–5] корпусные детали пороговых датчиков давления, температурные изменения размеров которых вызывают перемещения центров мембран, целесообразно выполнять из ковара 29НК-ВИ ГОСТ 10994-74, обеспечивающего хорошую свариваемость приборными видами сварок и герметичность спаев со стеклом С48-2 OST 11 027.010-75, из-за согласованности по коэффициенту линейного теплового расширения (КЛТР). Мембраны выполняются из холоднокатаных лент из бериллиевых бронз БрБНТ 1-9, БрБ2 ГОСТ 1789-2013, обеспечивающих высокую чувствительность и хорошую свариваемость с корпусными деталями из ковара, а также высокую электропроводность, так как электрическая цепь в датчиках организовывается через мембраны. Контакты, закрепляемые в центрах мембран, также выполняются из бериллиевых бронз. Одинаковый материал мембран и контактов обеспечивает надежное закрепление контактов, например, точечной лазерной сваркой. Указанные мембраны обеспечивают ход центра 0,5...0,6 мкм при изменении давления на 1 мм рт. ст. и настройку в составе датчика давления на пороговое значение разности давлений в несколько десятков мм рт. ст.

Из-за значительного различия КЛТР ковара ($6,1 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹) и бериллиевой бронзы ($16,6 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹) в требуемом диапазоне температур технические решения пороговых датчиков давления подобного типа требуют конструкторских мер, обеспечивающих компенсацию, неизбежной в этом случае, температурной погрешности, особенно если датчики эксплуатируются в широком диапазоне температур внешней среды. Температурная погрешность обычно значительно превышает погрешности от других физических факторов (вибрации, линейного ускорения).

Технические решения

Температурная погрешность вызывается изменением исходного расположения центров мембран, а следовательно, и зазора между контактами:

- из-за изменения линейных осевых размеров корпусных деталей, мембран и контактов;
- изменения площади мембран. Не имея возможности достаточного изменения протяженности места крепления к корпусной детали, мембрана в этом случае меняет свою «выпуклость», а следовательно, и расположение своего центра с закрепленным контактом.

Также температурная погрешность вызывается температурным изменением упругих свойств мембран. При пониженной температуре внешней среды мембраны становятся более «жесткими», а при повышенной – более «эластичными».

Исходная задача – разработка конструкции порогового датчика разности давлений для коммутации электрических цепей систем технических объектов при превышении разности подаваемых в датчик давлений некоторого порогового значения. Датчик должен быть работоспособным при температуре внешней среды в диапазоне от минус 50 до плюс 65 °С и после пребывания при температуре внешней среды в диапазоне от минус 60 до плюс 80 °С.

Широкий диапазон эксплуатации датчика давления, превышающий 100 °С, требует технических решений, обеспечивающих малую температурную погрешность. В ходе проведения работ были разработаны возможные конструкции порогового датчика разности давлений, представленные на рис. 1–4. Датчики выполнены в одних габаритах с использованием чувствительных элементов давления с одинаковыми гофрированными мембранами с краевым гофром. Контакты закреплены сварными точками в центрах мембран. Мембраны закреплены по внешнему диаметру сварными швами на встречно размещенных фланцах кронштейнов. Мембраны закреплены по внешнему диаметру сварными швами на встречно размещенных фланцах кронштейнов. Кронштейны запрессованы во втулки с герметизацией по торцу сварным швом. Втулки закреплены в корпусных деталях через стеклоизоляторы. Мембраны изготовлены из бериллиевой бронзы, корпусные детали, втулки и кронштейны – из ковара.

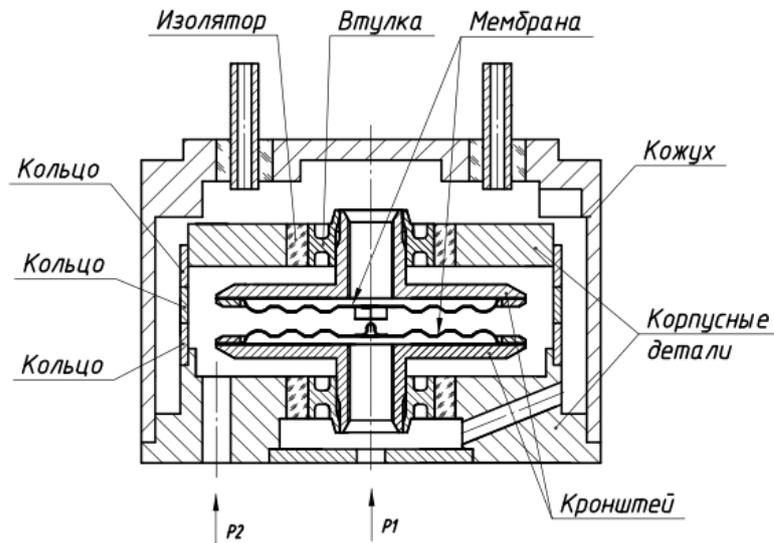


Рис. 1. Конструкция по варианту 1

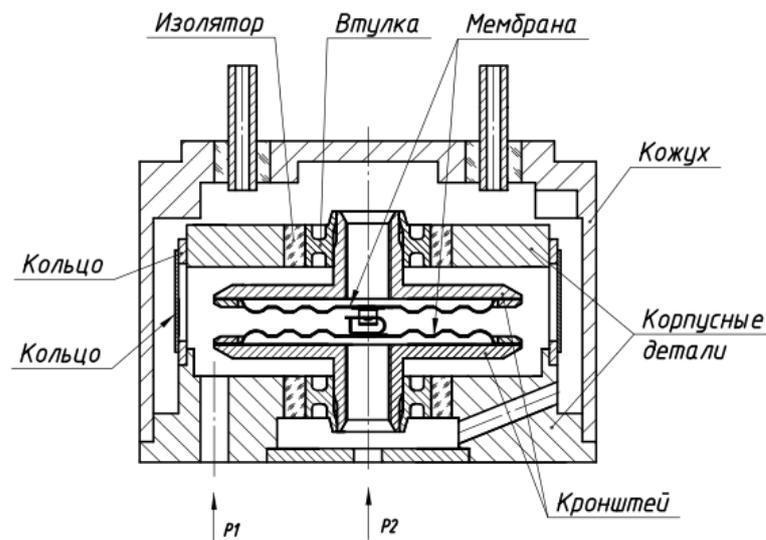


Рис. 2. Конструкция по варианту 2

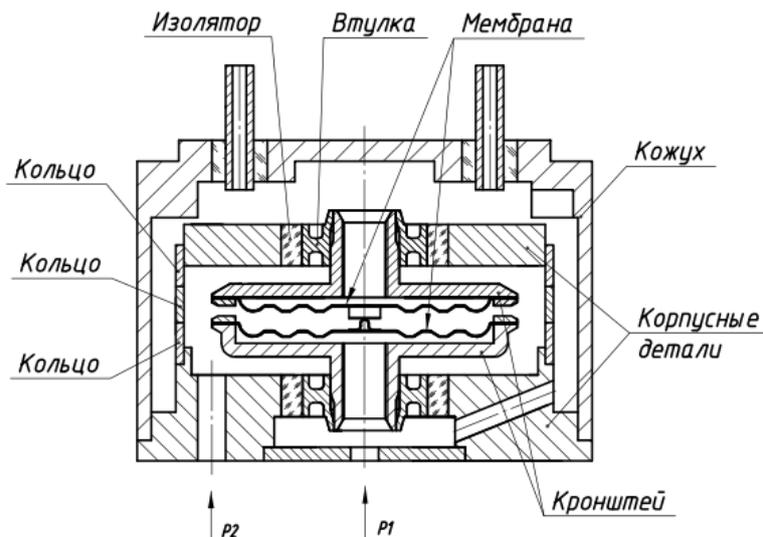


Рис. 3. Конструкция по варианту 3

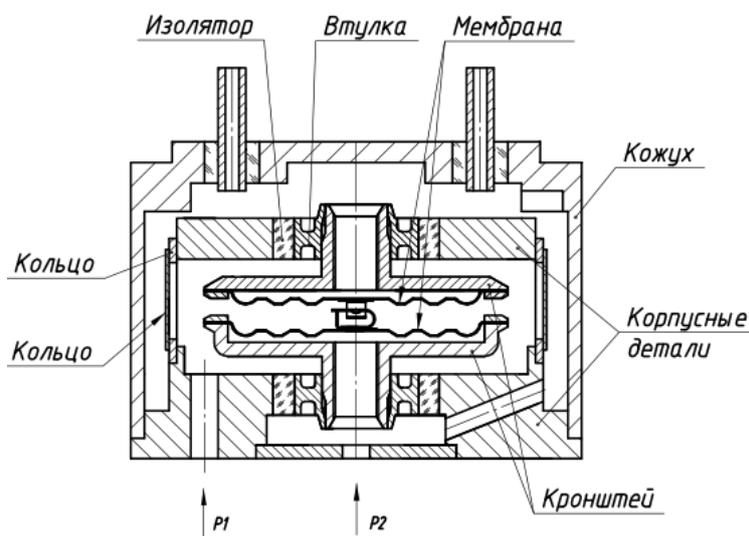


Рис. 4. Конструкция по варианту 4

Для уменьшения влияния изменений размеров кожуха на уставку (пороговое значение разности давлений), например от его деформаций при закреплении в объекте использования, основной механизм датчика (чувствительные элементы установленные в корпусные детали) закреплён консольно.

Для компенсации температурной погрешности в датчиках приняты определенные конструктивные меры.

Особенности конструкция датчика разности давлений по рис. 1 (вариант 1).

Применены контакты «прямого действия» (рис. 5), т.е. при увеличении высоты мембран (сближении центров мембран) зазор между контактами уменьшается, при уменьшении высоты мембран (взаимном удалении центров мембран) зазор между контактами увеличивается. Контакты выполнены с контактными зонами с цилиндрической поверхностью и установлены развернутыми относительно друг друга примерно на 90° . Закрепление контактов на мембранах показано на рис. 6. Меньшее давление P_2 подается в объем между мембранами. Мембраны установлены встречно выпуклой стороной друг к другу. Корпусные детали взаимно скреплены специальным компенсационным кольцом, выполненным их трех колец, крайние из которых изготовлено из ковара, среднее – из бериллиевой бронзы. Высота среднего кольца согласовывается с суммарной высотой мембран и контактов, то есть с расстоянием между плоскостями заделки мембран. Температурные изменения взаимного расположения контактирующих зон контактов компенсируются изменением высоты среднего кольца. Кроме того, выбором высоты среднего кольца возможно также компенсировать температурное изменение

упругих свойств мембран. В предельном случае все компенсационное кольцо может быть выполнено сплошным из бериллиевой бронзы.

Особенности конструкция датчика разности давлений по рис. 2 (вариант 2).

Применены контакты «обратного действия» (рис. 7), т.е. при увеличении высоты мембран (сближении центров мембран) зазор между контактами увеличивается, при уменьшении высоты мембран (взаимном удалении центров мембран) зазор между контактами уменьшается. Контакты заведены один за другой и установлены развернутыми примерно на 90° . Закрепление контактов на мембранах показано на рис. 8. Большее давление P_1 подается в объем между мембранами. Мембраны установлены встречно выпуклой стороной друг к другу. Корпусные детали взаимно скреплены сплошным кольцом, изготовленным из ковара. Для упрощения взаимной установки контактов и контроля их взаимного расположения в процессе сборки кольцо можно выполнить с окнами, герметизируемыми дополнительным тонкостенным кольцом, привариваемым на основное. Дополнительное кольцо изготавливается из такого же материала, что и основное. Температурные изменения взаимного расположения контактирующих зон контактов из-за изменения высоты мембран и контактов компенсируют температурные изменения упругих свойств мембран, так как при понижении температуры зазор между контактами уменьшается, а при повышении – увеличивается. Однако степень компенсации будет ограниченной, т.е. не в полной мере. Следует рассмотреть возможность выполнения кольца, скрепляющего корпусные детали, из сплава 32НҚД ГОСТ 10994-74, имеющего КЛТР не более $1,0 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$ в требуемом температурном диапазоне.

Особенности конструкция датчика разности давлений по рис. 3 (вариант 3).

Применены контакты «прямого действия» (рис. 5), т.е. при увеличении высоты мембран (сближении центров мембран) зазор между контактами уменьшается, при уменьшении высоты мембран (взаимном удалении центров мембран) зазор между контактами увеличивается. Контакты установлены развернутыми примерно на 90° относительно друг друга. Закрепление контактов на мембранах показано на рис. 6, а, б. Меньшее давление P_2 подается в объем между мембранами. Мембраны установлены последовательно разноименными поверхностями друг к другу. Корпусные детали взаимно скреплены специальным компенсационным кольцом, выполненным из трех колец, крайние из которых изготовлено из ковара, среднее – из бериллиевой бронзы. Высота среднего кольца согласовывается с суммарной высотой контактов. Температурные изменения расположения контактирующих зон контактов из-за изменения их высоты компенсируют температурные изменения высоты среднего кольца. Центры имеющих одинаковый профиль и расположенных последовательно мембран с закрепленными контактами при изменении температуры окружающей среды всегда перемещаются в одну и ту же сторону, сохраняя зазор между контактами, следовательно, не увеличивая температурную погрешность порогового датчика давления. В представленной конструкции выбором высоты среднего кольца возможно компенсировать температурное изменение упругих свойств мембран.

Особенности конструкция датчика разности давлений по рис. 4.

Применены контакты «обратного действия» (рис. 7), т.е. при увеличении высоты мембран (сближении центров мембран) зазор между контактами увеличивается, при уменьшении высоты мембран (взаимном удалении центров мембран) зазор между контактами уменьшается. Контакты заведены один за другой и установлены развернутыми примерно на 90° . Большее давление P_1 подается в объем между мембранами. Мембраны установлены последовательно разноименными поверхностями друг к другу. Закрепление контактов на мембранах показано на рис. 8, 9. Корпусные детали взаимно скреплены сплошным кольцом, изготовленным из ковара. Для упрощения взаимной установки контактов и контроля их взаимного расположения в процессе сборки кольцо можно выполнить с окнами, герметизируемыми дополнительным тонкостенным кольцом, привариваемым на основное. Дополнительное кольцо изготавливается из такого же материала, что и основное. Центры имеющих одинаковый профиль и расположенных последовательно мембран с закрепленными контактами при изменении температуры окружающей среды всегда перемещаются в одну и ту же сторону, сохраняя зазор между контактами, следовательно, не увеличивая температурную погрешность порогового датчика давления. Целесообразно выполнение кольца, скрепляющего корпусные детали, из сплава 32НҚД ГОСТ 10994-74, имеющего КЛТР не более $1,0 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$ в требуемом температурном диапазоне. Температурные изменения расположения контактирующих зон контактов из-за изменения высоты контактов, их упоров, а также корпусных деталей и кронштейнов компенсируют температурные изменения упругих свойств мембран.

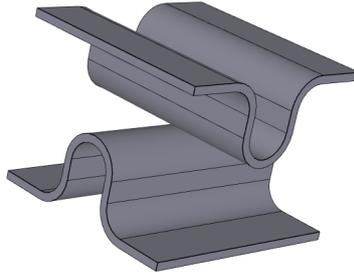
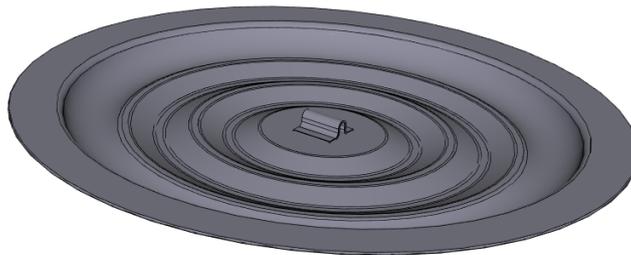


Рис. 5. Конструкция контактов «прямого действия»



a)



б)

Рис. 6. Мембрана с контактом «прямого действия»

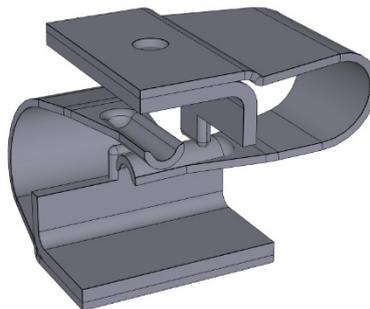


Рис. 7. Конструкция контактов «обратного действия»



Рис. 8. Конструкция контактов «обратного действия»



Рис. 9. Мембрана с контактом

Заключение

Все представленные варианты конструкций могут быть приняты за основу при разработке пороговых датчиков разности давления, эксплуатируемых в широком температурном диапазоне. Представляется целесообразным проведение моделирования работы датчиков с учетом изменения температуры внешней среды, по результатам которого будет выполнен более достоверный анализ возможностей вариантов конструкций.

По предварительной оценке возможность компенсации температурной погрешности может быть достигнута в большей степени в вариантах 2 и 4.

Кроме того, конструкции датчиков по вариантам 3, 4 с последовательным расположением одинаковых мембран с одинаковыми контактами, следовательно, имеющих одинаковые амплитудно-частотные характеристики, предположительно также обеспечат более низкие погрешности от механических физических факторов, например вибрации и линейного ускорения, т.е. датчики могут быть использованы также в подвижных объектах.

Учитывая влияние деформации корпусных деталей на зазор между контактами и на установку датчиков, следует в конструкциях исключать эти возможные деформации. Например, оснащая каналы приема давления P_1 , P_2 штуцерами с радиальным уплотнением, не создающим усилия на нижней корпусной детали в осевом направлении.

Список литературы

1. Андреева Л. Е. Упругие элементы приборов. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1981. 392 с.
2. Патент РФ №2707879, МПК Н 01 Н 35/14. Исполнительное коммутирующее устройство / Китаев В. Н., Китаева Е. Н. № 2019104512 ; заявл. 18.02.2019 ; зарег. 20.09.2019.
3. Патент РФ №2617708, МПК Н 01 Н 35/14. Исполнительное коммутирующее устройство / Китаев В. Н., Китаева Е. Н. № 2016105045 ; заявл. 15.02.2016 ; зарег. 26.04.2017.
4. Кибальник А. В., Китаева Е. Н., Савкин А. А. Конструкции чувствительных элементов, используемые в разрабатываемых пороговых барометрических приборах давления // Электромеханические приборы. 2011. № 104. С. 42–45.
5. Бабушкина Е. В. [и др.]. Повышение надежности и снижение погрешностей пороговых барометрических приборов технологическими тренировками при их сборке // Электромеханические приборы. 2011. № 104. С. 35–41.
6. Пономарев В. Н., Трофимов А. А., Дерябин Д. В. [и др.]. Проектирование датчика температуры методом имитационного моделирования // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 3. С. 55–61.
7. Адамов А. П., Адамова А. А., Семенцов С. Г. Современные материалы в конструкции датчиков для аэрокосмических аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 1. С. 84–90.

References

1. Andreeva L.E. *Uprugie elementy priborov. 2-e izd., pererab. i dop. = Elastic elements of devices. 2nd ed., reprint and additional.* Moscow: Mashinostroenie, 1981:392. (In Russ.)
2. Patent Russian Federation №2707879, MPK N 01 N 35/14. *Ispolnitel'noe kommutiruyushchee ustroystvo = Executive switching device.* Kitaev V.N., Kitaeva E.N. № 2019104512; appl. 18.02.2019; reg. 20.09.2019. (In Russ.)
3. Patent Russian Federation №2617708, MPK N 01 N 35/14. *Ispolnitel'noe kommutiruyushchee ustroystvo = Executive switching device.* Kitaev V.N., Kitaeva E.N. № 2016105045; appl. 15.02.2016; reg. 26.04.2017. (In Russ.)
4. Kibal'nik A.V., Kitaeva E.N., Savkin A.A. Designs of sensitive elements used in threshold pressure barometric devices under development. *Elektromekhanicheskie pribory = Electromechanical devices.* 2011;(104):42–45. (In Russ.)
5. Babushkina E.V. et al. Increasing reliability and reducing errors of threshold barometric devices by technological training during their assembly. *Elektromekhanicheskie pribory = Electromechanical devices.* 2011;(104):35–41. (In Russ.)

6. Ponomarev V.N., Trofimov A.A., Deryabin D.V. et al. Designing a temperature sensor by simulation modeling. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(3):55–61. (In Russ.)
7. Adamov A.P., Adamova A.A., Sementsov S.G. Modern materials in the design of sensors for aerospace vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(1):84–90. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Николаевич Китаев

начальник конструкторского отдела,
Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт
технической физики имени академика Е. И.
Забабахина
(Россия, г. Снежинск, ул. Васильева, 13)
E-mail: kb2@vniitf.ru

Дмитрий Игоревич Сафонов

инженер,
Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт
технической физики имени академика Е. И.
Забабахина
(Россия, г. Снежинск, ул. Васильева, 13)
E-mail: kb2@vniitf.ru

Александр Евгеньевич Кирюнин

инженер,
Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт
технической физики имени академика Е. И. Забабахина
(Россия, г. Снежинск, ул. Васильева, 13)
E-mail: kb2@vniitf.ru

Екатерина Константиновна Хованова

инженер,
Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт
технической физики имени академика Е. И. Забабахина
(Россия, г. Снежинск, ул. Васильева, 13)
E-mail: kb2@vniitf.ru

Vladimir N. Kitaev

Head of the Design Department,
Russian Federal Nuclear Center – All-Russian
Scientific Research Institute of Technical Physics
named after Academician E.I. Zababakhin
(13 Vasyliiev street, Snezhinsk, Russia)

Dmitry I. Safonov

Engineer,
Russian Federal Nuclear Center – All-Russian
Scientific Research Institute of Technical Physics
named after Academician E.I. Zababakhin
(13 Vasyliiev street, Snezhinsk, Russia)

Aleksandr E. Kiryunin

Engineer,
Russian Federal Nuclear Center – All-Russian
Scientific Research Institute of Technical Physics
named after Academician E.I. Zababakhin
(13 Vasyliiev street, Snezhinsk, Russia)

Ekaterina K. Khovanova

Engineer,
Russian Federal Nuclear Center – All-Russian
Scientific Research Institute of Technical Physics
named after Academician E.I. Zababakhin
(13 Vasyliiev street, Snezhinsk, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию / Received 25.01.2024

Поступила после рецензирования / Revised 10.02.2024

Принята к публикации / Accepted 26.02.2024